

CARS TEMPERATURMESSUNG AM H_2 -MOLEKÜL IN EINER KRYOGENEN LOX/ H_2 - RAKETENBRENNKAMMER UNTER ÜBERKRITISCHEN BEDINGUNGEN

W.Clauß, D.N.Klimenko, M.Oschwald, W.Mayer und J.Smith*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Raumfahrtantriebe, Langer Grund, 74239

Hardthausen

*University of Adelaide, Department of Mechanical Engineering, Australia

1. ABSTRAKT

Kohärente anti-Stokes Raman Streuung wurde zur Messung eines Temperaturfeldes in einer LOX/ GH_2 -Modellbrennkammern am Prüfstand P8 angewendet. Der Brennkammerdruck lag mit etwa 6 MPa im überkritischen Bereich für Sauerstoff. Das H_2 -Molekül wurde als Probenmolekül verwendet und mittels eines "Dual-Broadband"-CARS-Aufbaus angemessen. Linienverbreiterungskoeffizienten für die Q-Zweig Rotationslinien des H_2 mußten in Laborexperimenten für die erwarteten hohen Temperaturen bestimmt werden. Der CARS-Aufbau wurde den Bedingungen des Prüfstandsbetriebes entsprechend verstärkt und weitestgehend schwingungsunempfindlich gemacht. Bimodale Temperaturverteilungen zeigten eine hochturbulente Verbrennungszone.

2. EINLEITUNG

Die Entwicklung kryogen arbeitender Raketenmotoren stellt immer noch eine große Herausforderung für Konstrukteure und Hersteller dar. In der Vergangenheit beruhte die Entwicklung auf angesammeltem experimentellem Wissen und "trial and error"-Methoden. Seit einiger Zeit haben numerische Methoden Einzug in den Entwicklungsprozeß gehalten, aber die Komplexität der in LOX/ GH_2 -Brennkammern auftretenden miteinander verflochtenen Prozesse wie Treibstoffinjektion, Atomisierung, Verdampfung von Tropfen, Mischung und Verbrennung macht eine

experimentelle Validierung mittels aufwendiger Diagnoseverfahren nötig. Besonders die Kenntnis von lokalen Temperaturen und Konzentrationen ist grundlegend für eine genaue Modellierung der Reaktionsmechanismen und ihre Auswirkung auf das makroskopische Verhalten der Brennstoffe.

Fortschrittliche Raketenmotoren werden üblicherweise mit gasförmigem H_2 (GH_2) und flüssigem, kryogenem, O_2 (LOX) bei Brennkammerdrücken bis zu 112 MPa betrieben [1-3]. Unter den dabei herrschenden Verbrennungsbedingungen verlässliche Daten zu erhalten, ist schwierig. Die transiente, hochturbulente Verbrennung erfordert Diagnoseverfahren mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, die zudem den Verbrennungsprozeß nicht beeinflussen. Anfangs wurden optische Verfahren eingesetzt, die auf der Detektion von sowohl spontaner als auch laserinduzierter Emission des OH Radikals beruhen. Die quantitative Auswertung der Daten ist hier aber schwierig, denn die Quenchingraten sind bei den hohen Drücken nicht bekannt und auch die Absorption des anregenden Laserstrahl in der flüssigen Phase beeinflusst die Meßgenauigkeit.

Heute hat sich die Kohärente anti-Stokes Raman Streuung (CARS) [4] allgemein als optisches Diagnoseverfahren zur Messung von Temperaturen und Konzentrationen in technischen Brennräumen durchgesetzt [5,6]. Das Verfahren wird seit fast zwei Jahrzehnten angewendet in Gasturbinen, Ramjet-Triebwerken oder Ottomotoren. Der Sauerstoff wird

hier aus der Luft entnommen und damit kann der sich im Brennraum befindende Stickstoff als Probenmolekül genutzt werden. Die CARS-Thermometrie des N_2 ist gut entwickelt und die Spektroskopie auch bei hohen Drücken hinreichend verstanden, um aus der spektralen Signatur Temperaturen bestimmen zu können.

In LOX/ GH_2 -Flammen steht als Probenmolekül H_2 , O_2 und H_2O zu Verfügung. Da Raketentriebwerke immer brennstoffreich betrieben werden, entfällt O_2 als Minoritätsspezies für die CARS-Anwendung. Die Majoritätsspezies H_2 und H_2O sind in der Brennkammer gut detektierbar, die Molekülparameter sind aber nicht ausreichend erforscht. Insbesondere die Verbreiterung der Spektrallinien des H_2 bei hohen Drücken musste erst in Grundlagenexperimenten ermittelt werden.

3. DIE CARS DIAGNOSTIK

CARS ist ein Vier-Wellen-Mischprozeß aus dem Gebiet der nichtlinearen Optik. Drei Photonen mit den Frequenzen ω_1 , ω_2 and ω_2' werden in ein gemeinsames Volumen (Meßvolumen) eingestrahlt und wirken auf die nichtlineare Suszeptibilität dritter Ordnung $\chi^{(3)}(\omega)$ der dort befindlichen Materie ein. Die zwei Photonen ω_2 and ω_2' erzeugen dabei eine kohärente Molekülschwingung, an der das Photon ω_1 inelastisch gestreut wird. Diese gestreute Welle ist das CARS-Signal.

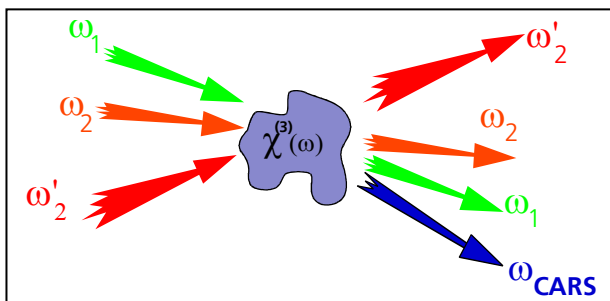


Abbildung 1: Der CARS Prozeß

Wenn die Frequenzdifferenz zwischen ω_2 and ω_2' gleich der Frequenz eines Ramanüberganges einer im Meßvolumen befindlichen Spezies ist, dann wird das CARS-Signal dieser Spezies (Probenmolekül) resonant verstärkt. Hierzu muß die Spezies natürlich Ramanaktiv sein, d.h. die Änderung eines molekularen Freiheitsgrades führt zur Änderung der Polarisierung.

CARS-Signale werden erzeugt bei folgenden Frequenzen:

- $\omega_{CARS2} = 2\omega_1 - \omega_2$

bei Resonanzen von $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ (wenn $\omega_1 = \omega_2'$)

- $\omega_{CARS2'} = 2\omega_1 - \omega_2'$

bei Resonanzen von $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2'$ (wenn $\omega_1 = \omega_2$)

- $\omega_{CARSdbb} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_2'$

bei Resonanzen von $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_2'$

Letzteres ist das so genannte "Dual-Broadband-CARS", bei dem drei Laser benötigt werden, während die ersten beiden als "degenerierte" oder "Single-Broadband-CARS"-Prozesse bezeichnet werden, denn hier werden zwei Photonen von demselben Laser verwendet. Experimentell wird für CARS ein frequenzverdoppelter Nd:YAG Puls laser bei 532 nm verwendet, der zugleich zwei Farbstofflaser (Stokeslaser) pumpt. Die hohe Zeitauflösung wird erreicht, indem die Stokeslaser ein Frequenzband entsprechend der Breite der molekularen Schwingungsübergänge des Probenmoleküls überdecken. Dann wird das gesamte CARS-Spektrum von jedem Laserpuls erzeugt und kann mit einem Spektrographen und Vielkanaldetektor registriert werden. Die Temperatúrauswertung erfolgt durch Vergleich des experimentell aufgezeichneten Spektrums mit einem theoretisch modellierten Spektrum über eine Anpassung der kleinsten Fehlerquadrate.

4. WASSERSTOFF-CARS

H_2 ist auf den ersten Blick ein ideales Molekül zur Verbrennungsdiagnostik. Da sowohl die Rotationskonstante B als auch die Schwingungskonstante α beide sehr groß sind, ist der Q-Zweig des Wasserstoff-CARS-Spektrums charakterisiert durch wenige, weit auseinanderliegende Rotationsschwingungslinien im Bereich von 4000 bis 4155 cm^{-1} . Die Temperaturempfindlichkeit ist ausgeprägt (siehe Abbildung 2).

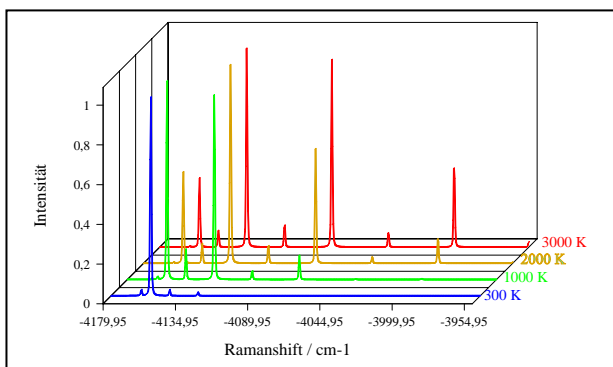


Abbildung 2: Das Wasserstoff-CARS-Spektrum bei verschiedenen Temperaturen

Infolge dieser weit getrennten Linien kommt es zu keinen stoßbedingten Interferenzen zwischen den Linien, was die Interpretation des Spektrums wesentlich vereinfacht.

Ein Nachteil entsteht aber hinsichtlich der Meßgenauigkeit.

Die erzielte Meßgenauigkeit hängt zum einen von der stochastischen Arbeitsweise der verwendeten Puls laser ab und zum zweiten von der Güte der vorhandenen Moleküldaten.

Durch die nichtlineare und kohärente Natur des CARS-Signals führen die Schwebungen zwischen den Pumplaser-Moden zu starken Schwankungen in der Intensitätsverteilung eines CARS Spektrums, was wiederum Fehler bei der Temperaturbestimmung verursacht. Der einzige Weg um diesen Nachteil

auszugleichen ist die Einführung einer Mittelung bei der Messung. Zeitliche Mittelung durch Aufsummieren mehrerer aufeinanderfolgender Laserpulse ist in technischen Anwendungen nicht möglich, da dadurch der Vorteil der hohen Zeitauflösung vernichtet wird.

Wenn die Spektrallinien des Probenmoleküls eng beinanderliegen und schon ineinander übergehen, entsteht eine Mittelung über die Rotationsstruktur des angemessenen Schwingungsüberganges und eine für technische Zwecke hinreichend genaue Temperatureauswertung erfolgt über die Einhüllende der Molekülübergänge.

Bei CARS am Wasserstoffmolekül mit seinen wenigen weit auseinanderliegenden Spektrallinien muß dagegen der Weg über spektrale Mittelung bei Dual-Broadband-CARS eingeschlagen werden. Hierbei wirken die vielen spektralen Komponenten der beiden Breitband-Stokeslaser mitteln über das Spektrum der die Molekülschwingung erzeugenden Laserfelder. Die Verwendung eines Einmodenpumplasers und modenloser Stokeslaser verbessert die Mittelung wesentlich. Eine statistische Meßgenauigkeit von etwa 5% für den einzelnen Laserpuls wurde experimentell ermittelt [7]

Zur Modellierung der spektralen Signatur der CARS-Spektren müssen die Moleküldaten, insbesondere die Verbreiterungskoeffizienten der einzelnen Rotationslinien des Moleküls, bekannt sein. Diese Koeffizienten sind auch vom jeweiligen Stoßpartner abhängig. Abbildung 3 zeigt einen Theorie-Experiment-Vergleich (Fit) an einem H_2 -CARS-Spektrum mit zwei verschiedenen Sätzen von Linienverbreiterungsdaten. Der Fit identisch, aber es gibt einen systematischen Temperaturfehler von über 300 K.

Für Wasserstoff gab es Daten für das Kollisionssystem H_2-H_2O von Berger, Michaud und Chaussard [8-10]. Diese Daten wurden in einer Druckkammer bei Temperaturen bis maximal 1800 K gemessen und mußten für die Anwendung bei den

höheren Temperaturen in einer Raketenbrennkammer extrapoliert werden.

Um diese Unsicherheit auszuschließen, wurde vom DLR zusammen mit der Gruppe von Prof. Smirnov beim Institut für Allgemeine Physik der Akademie der Wissenschaften Rußlands in Moskau ein Projekt zur Linienbreitenmessung unter realistischen Brennkammerbedingungen formuliert und durchgeführt [11].

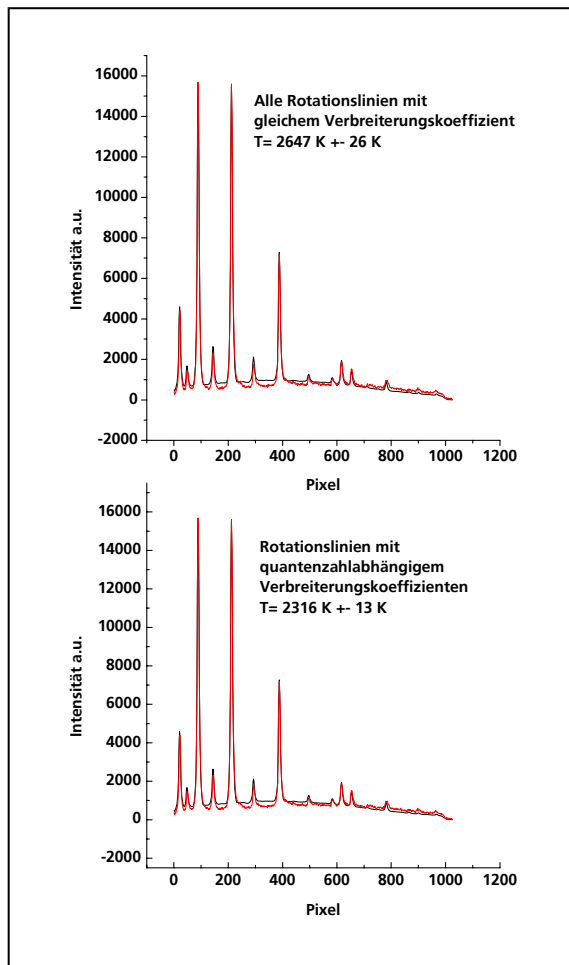


Abbildung 3: Fit eines H_2 -Spektrums mit verschiedenen Moleküldatensätzen

5. MESSUNG VON LINIENBREITEN IM WASSERSTOFF Q-ZWEIG IN EINEM PULSBRENNER

Da in einem stationär arbeitenden H_2/O_2 -Hochdruckbrenner die benötigten H_2 -Dichten nicht erreichbar waren, entstand die Idee der Messung in

einer Detonationszone d.h. ein kleines vorgemischtes Volumen von Wasserstoff und Sauerstoff wird mittels einer Zündquelle zur Reaktion gebracht und durch die schnelle CARS-Diagnostik untersucht.

Der Pulsbrenner bestand aus einem Edelstahlkörper mit einem etwa 2 cm^3 großen Verbrennungsraum. Der Verbrennungsraum war optisch durch kleine Fenster zugänglich. Eine Bohrung diente als Abgasdüse. Ein schneller gekühlter druckaufnehmer registrierte den Druckverlauf während der Verbrennung.

Wasserstoff und Sauerstoff wurden für eine bestimmte Zeit in den Brenner geleitet bis stationäre Strömungsverhältnisse vorhanden waren. Dann schlossen zu Zufuhrventile, die Gasmischung wurde durch die Zündkerze gezündet und eine definierte Zeit danach erfolgte der CARS-Laserpuls (siehe Abbildung 4). Der gesamte Vorgang wiederholte sich dann. Eine Repetitionsrate von 1 Hz erwies sich als versuchsgerecht.

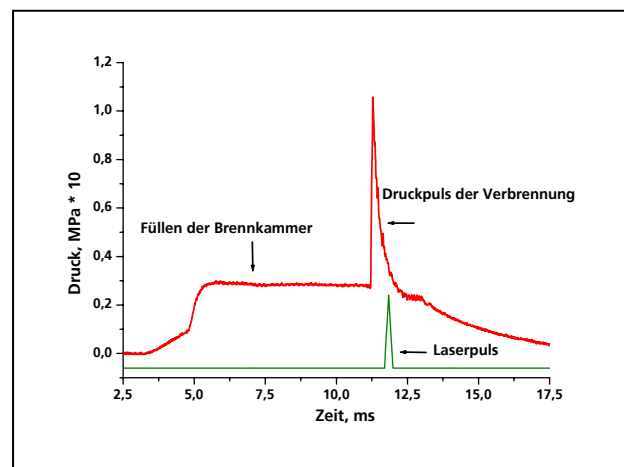


Abbildung 4: Versuchsaufbau im Pulsbrenner

Zu jedem Verbrennungspuls mußten die Parameter Temperatur, Linienbreite und Wasserkonzentration gleichzeitig gemessen werden. Dazu war ein Breitband-CARS-System zur Temperaturmessung installiert. Ein zweites CARS-System mit einem schmalbandigen Stokeslaser regte gezielt die Linien des Wasserstoff-Q-Zweiges an, deren CARS-Signal dann in einem Fabry-Perot-Interferometer zerlegt und

mittels eines Zeilendetektors aufgezeichnet wurde. Ein vom Nd:YAG-Pumplaser angeregtes spontanes Ramansignal des Wassermoleküls diente zur Bestimmung der Wasserkonzentration. (siehe Abbildung 5).

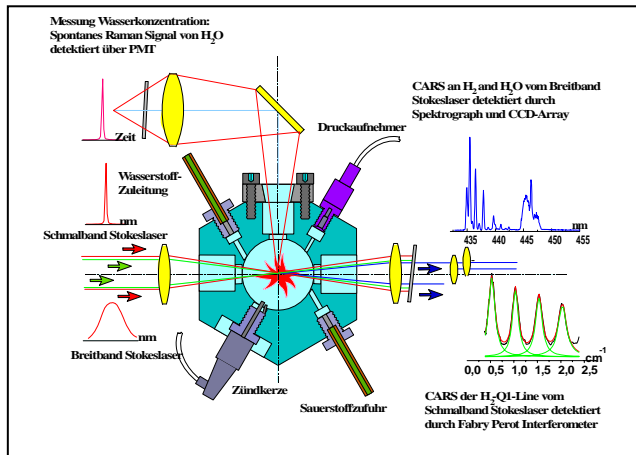


Abbildung 5: Der Versuchsaufbau des Pulsbrenners.

Durch Verschieben des Laserpulses zur Zündung konnten Messungen bei verschiedenen Verbrennungstemperaturen vorgenommen werden. (siehe Abbildung 6)

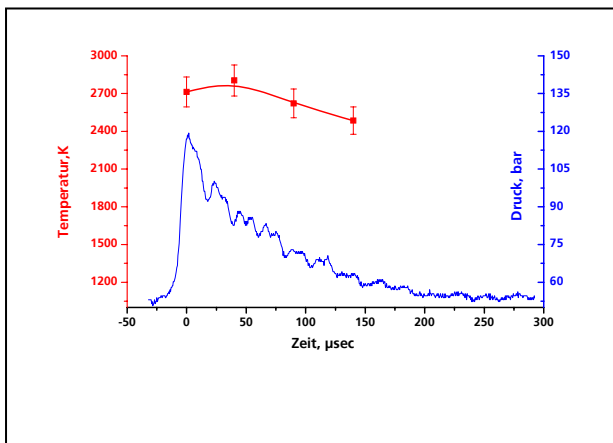


Abbildung 6: Druck- und Temperaturverlauf im Pulsbrenner.

Mittels dieses Versuchsaufbaus gelang die Linienbreitenmessung im Bereich über 2500 K. (siehe Abbildung 7). Die gemessenen Koeffizienten liegen

gut im Extrapolationsbereich der aus Zellenmessungen vorhandenen Daten.

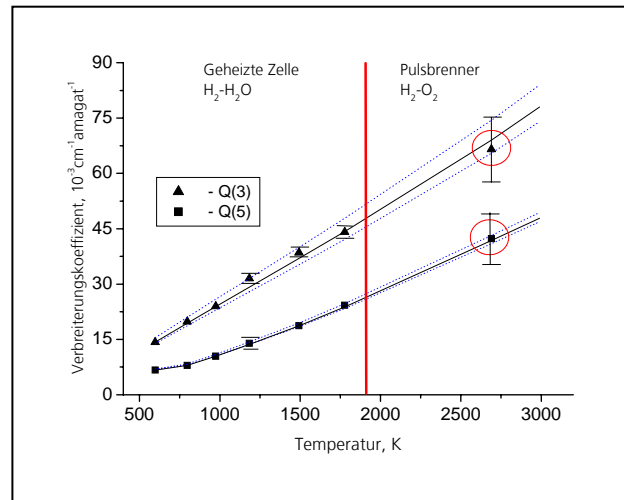


Abbildung 7: Linienverbreiterungskoeffizienten für die Wasserstoff Q(3)- und Q(5)-Linien als Funktion der Temperatur.

6. TEMPERATURMESSUNG IN DER BRENNKAMMER C AM PRÜFSTAND P8

6.1 DAS CARS-SYSTEM

Das CARS-System bestand aus drei Teilen: Laser, Brennkammeroptik und Detektionseinheit. Der Laser war ein Coherent Inc. Infinity Nd:YAG, der nur eine Mode hat. CARS wurde erzeugt mit 8mJ pro Puls bei 10 Hz Repetitionsrate. Pulsdauer war 3 ns. Der Dual-Broadband Aufbau wurde mit zwei Farbstofflasern verwirklicht. Beide Laser waren mit transversal gepumpten Oszillator- und Verstärkerzellen ausgerüstet. Farbstofflaser I war ein modenloser Rhodamine 6G (Methanol) Laser, der um 558 nm mit einer Bandbreite von $\sim 170 \text{ cm}^{-1}$ und einer Energie von etwa 3 mJ arbeitete. Farbstofflaser II war ein modenloser Pyridine 1 (DMSO) Laser, der eine Energie von 4 mJ erreichte. Seine Zentralwellenlänge war 713 nm bei einer Bandbreite von $\sim 350 \text{ cm}^{-1}$. Die Frequenzdifferenz dieser beiden Laser überdeckte den

fundamentalen Q_{01} -Zweig von Wasserstoff mit den Rotationslinien Q(5)-Q(11).

Die Laserstrahlen wurde durch Teleskope in Durchmesser und Divergenz angepaßt und erreichten das Meßvolumen in einem Zeitfenster von 0.5 ns. Die Strahlgeometrie war "planar BOXCARS" wobei die roten und grünen Strahlen gemeinsam laufen und der gelbe Strahl in 10 mm Parallellabstand.

Die Brennkammeroptik diente dazu, ein Meßpunkteraster in der Brennkammer anzufahren. Dazu wurden die Laserstrahlen mit auf Translationseinheiten montierten Spiegeln entsprechend umgelenkt. Eine Linse von 200mm Brennweite fokussierte die Laserstrahlen in der Brennkammer in das gemeinsame Meßvolumen von etwa 2mm Länge und 70µm Durchmesser. Das CARS Signal wurde in einen 600 µm durchmessende Quarzlichtleiter eingespeist. Diese Brennkammeroptik befand sich unmittelbar um die Brennkammer herum und war in Betrieb starken Vibrationen ausgesetzt. Sämtliche Optiken wurden auf einer schweren geschweißte Stahlkonstruktion so stabil wie möglich befestigt.

Die Quarzfaser leitete das CARS-Signal in einen Jobin Yvon HR460 Spectrographen mit 460 mm Brennweite und einem Gitter von 1200 l/mm. Ein Princeton Instruments CCD Detektor mit 256 x 1024 Pixeln (Pixelgröße 25 µm) nahm gesteuert von einem St 138 Detectorkontroller während des Versuchslaufs die Sequenzen von Einzelpuls-CARS-Spektren. Während des 20 s dauernden Versuches konnten bei 10 Hz Lasertakt 200 CARS-Spektren aufgezeichnet werden. Die Daten wurden in Echtzeit auf einem PC abgespeichert. Die Weiterverarbeitung der Spektren konnte mittels selbstentwickelten Rechenprogrammes ebenfalls auf einem PC durchgeführt werden.

Abbildung 8 zeigt eine Skizze des CARS-Aufbaus in einer Konfiguration mit longitudinal gepumpten Stokeslasern.

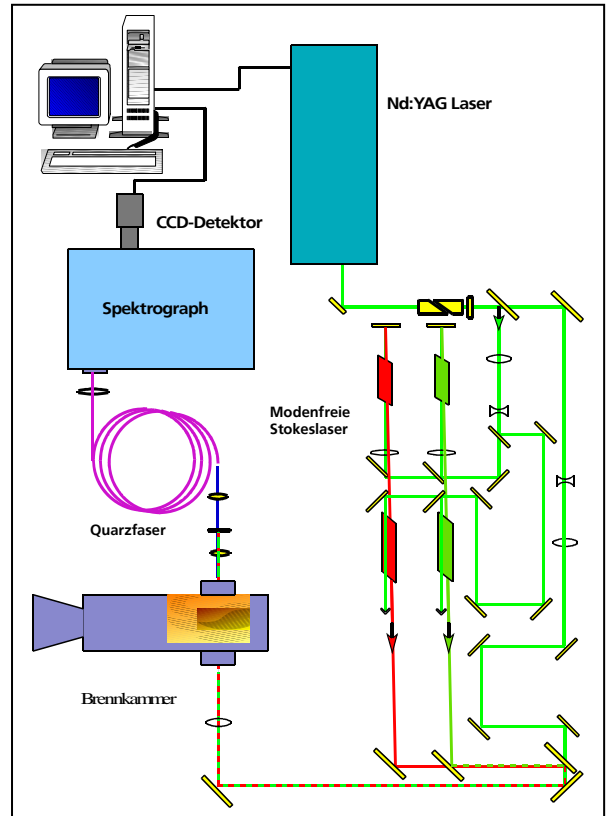


Abbildung 8: Dual-Broadband CARS-System mit modenfreien Farbstofflasern

6.2 DIE BRENNKAMMER MODELL C

In den Experimenten wurde die speziell für die Anwendung optischer Diagnostiken entwickelte „Brennkammer C“ verwendet.

Die Brennkammer bestand aus einzelnen Segmenten, die aus Kupfer gefertigt und wassergekühlt waren. Um die Strömung interpretierbar zu halten, war ein einzelner Koaxial-Injektor ohne Taper oder Recess eingebaut. Eine Schnittzeichnung der Brennkammer C ist unter Abbildung 9 zu finden.

Die Brennkammer hatte ein Fenstermodul, das an verschiedenen Stellen eingebaut werden konnte und das aus zwei gegenüberliegenden Quarzfenstern bestand. Die freie Fensteröffnung betrug 125 mm in der Länge und 25 mm in der Höhe bei einer Dicke von

40 mm. Die Fenster waren im Betrieb filmgekühlt mit H_2 .

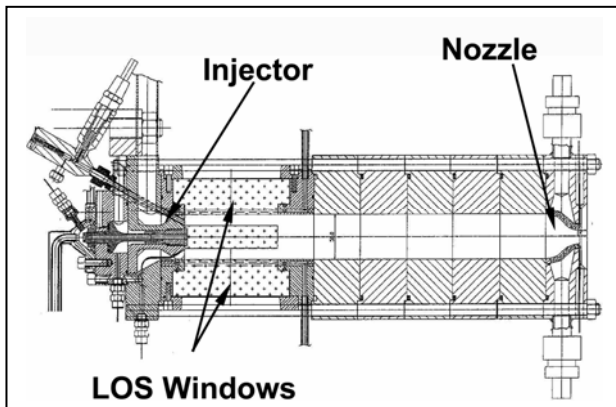


Abbildung 9: Brennkammer C

Die Versuchsbedingungen für die Brennkammer C sind in folgender Tabelle aufgelistet

H_2 Temperatur K	117
O_2 Temperatur K	115
H_2 Dichte $kg\ m^{-3}$	11,95
O_2 Dichte $kg\ m^{-3}$	1133,8
H_2 Massenstrom $kg\ s^{-1}$	0,06
O_2 Massenstrom $kg\ s^{-1}$	0,29
Mischungsverhältnis (O/F)	5
Geschwindigkeitsverhältnis	~ 12
Brennkammerdruck MPa	5,94
H_2 -Reynoldszahl	$3,0 \times 10^6$
O_2 -Reynoldszahl	$7,9 \times 10^5$

6.3 MESSERGEBNISSE

Testläufe bei einer H_2 -Temperatur von 65 K erzeugten eine Verbrennungszone mit starken Turbulenzen und geringer turbulenter Längenskala. Die dadurch erzeugten, im sub-mm-Bereich variierenden Dichtegradienten zerfächerten (defokussierten) die Laserstrahlen völlig, so daß kein CARS-Signal erzeugt werden konnte.

Bei einer Einspritztemperatur des Wasserstoffs von 117 K konnte CARS eingesetzt werden. Immer noch

vorhandene fluktuierende Dichtegradienten führten während der CARS-Erfassungssequenz zu stark schwankender Signalintensität und an manchen Meßorten zu Signalverlust bei bis zu 50% der Laserpulse. Die Laserstrahlen wurden nicht mehr defokussiert sondern auf ihrem Weg abgelenkt wodurch die Überlappung im Meßvolumen reduziert wurde. Eine Validationsrate definiert als Anzahl ausgewerteter Laserpulse zu Gesamtzahl der Laserpulse wurde eingeführt, um den Signalverlust quantitativ zu erfassen.

Es wurden zwei Querschnitte bei 50 mm und 80mm stromab der Injektorplatte vermessen. Wie Abbildung 10 zeigt, wurde jeder Querschnitt in Meßpunkte mit 2 mm Abstand aufgeteilt. Am Punkt 50 mm/ 2mm war kein Signal zu erhalten.

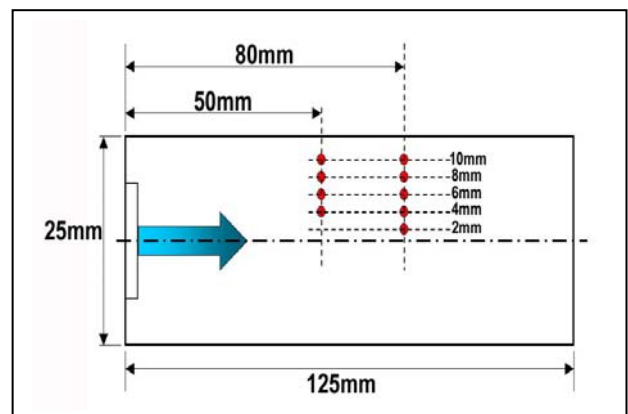


Abbildung 10: Meßpunkte in der Brennkammer C

Die aufgezeichneten CARS-Spektren wurden einer Temperatúrauswertung über einen Theorie-Experiment-Vergleich unterzogen.

Bei einer während des Versuchs vorherrschenden Dichte von 15 bis 30 Amagat können die Kollisionen zwischen den Molekülen als binär betrachtet werden und die Linienverbreiterung kann als Summe der Beiträge von Wasser- und Wasserstoffkomponenten berechnet werden. Es wurden die neu ermittelten Datensätze für die Verbreiterung der individuellen Q-Zweig-Linien verwendet.

Um die Verteilung der Temperaturen in einem Testlauf feststellen zu können, erfolgte die Darstellung der Temperaturwerte zunächst in Form von Histogrammen.

Im 50 mm Querschnitt waren schmale Verteilungen bei niedriger Temperatur zu verzeichnen.

An dem 80 mm-Querschnitt wurden zu jedem Meßpunkt Histogramme mit ausgeprägter Bimodalität festgestellt. (siehe Abbildungen 11 und 12).

Ein Bias zu niedrigen Temperaturen war immer zu bemerken.

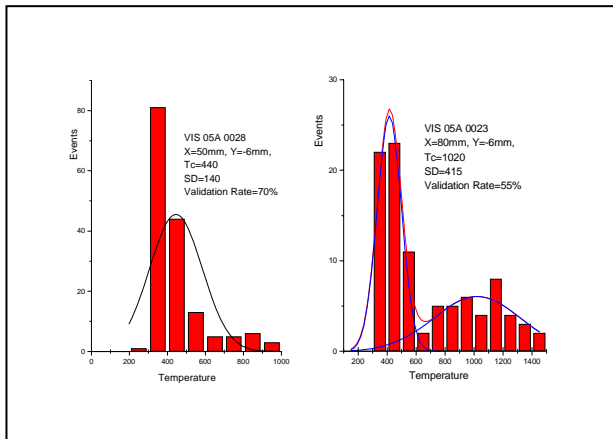
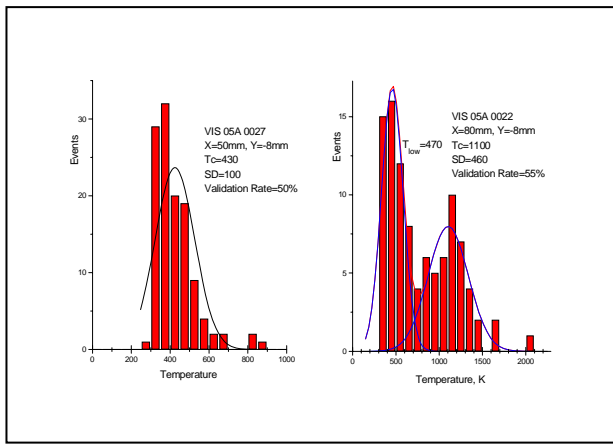


Abbildung 11 und 12 Temperaturhistogramme

Als globale Information wurde dann aus den Histogrammen der Temperaturmittelwert errechnet (siehe Abbildung 13).

Hierbei kam die Bimodalität zur Berücksichtigung, indem für jeden Meßpunkt des 80 mm Querschnittes zwei Mittelwerte dargestellt wurden.

Die Zahlenwerte in (%) an den einzelnen Meßpunkten geben die Validationsraten an.

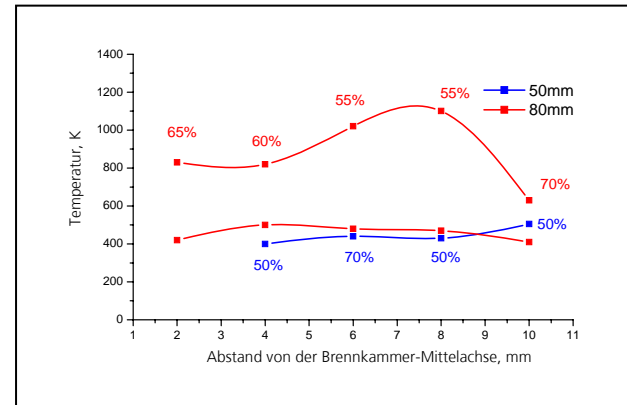


Abbildung 13. Temperaturmittelwerte

6.4 DISKUSSION

Starke Dichtgradienten existierten in der Scherschicht zwischen flüssigem Sauerstoff und gasförmigem Wasserstoff. Die dadurch verursachte Defokussierung und Ablenkung der Laserstrahlen führte zu Signalausfall an einem Meßpunkt und zu Signalverlusten an den anderen Meßpunkten.

Die Meßpunkte im 50 mm-Querschnitt zeigten eine niedrige Temperatur mit unimodaler Verteilung. Der Mittelwert liegt bei 400 K bis 500 K. Wir vermuten hier einen Einfluß der H_2 -Filmkühlung der Beobachtungsfenster.

Der 80 mm-Querschnitt zeigte ein anderes Verhalten. Die häufige Bimodalität der Temperaturhistogramme scheint ein Effekt des oszillierenden Einspritzstrahles aus flüssigem Sauerstoff zu sein. Durch Scherkräfte wird dieser Strahl aufgebrochen, so daß LOX-Tröpfchen entstehen, die an ihrer Oberfläche mit Wasserstoff die Verbrennung herbeiführen. Dieser Vorgang ist räumlich nicht stabil. Die Meßvolumina der Punkte bei

4 mm, 6 mm und 8 mm liegen zum einen Zeitpunkt innerhalb der Scherschicht, zum nächsten Zeitpunkt außerhalb.

Die beiden Meßpunkte bei 2 mm und 10 mm wurden davon nicht betroffen. Bei 2 mm ist eine breite unimodale Temperaturverteilung von 200 K bis 2000 K festzustellen. Hier fluktuiert die Reaktionszone ohne feststellbare Regelmäßigkeit um das Meßvolumen.

Der Meßpunkt bei 10 mm lag nahe der Brennkammerwand außerhalb der Scherzone. Auch hier war eine unimodale Verteilung bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen vorhanden.

Die gemessenen Temperaturen lagen nicht in dem rechnerisch bei 6 MPa zu erwartenden Bereich von über 3000 K. Die Verbrennungszone um die Scherschicht herum ist ein chaotischer Bereich, in dem selten stöchiometrische Mischungsverhältnisse vorliegen, so daß die Verbrennungstemperaturen maximal bei 2000K liegen.

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die CARS-Diagnostik konnte in einer kryogenen Raketenbrennkammer unter überkritischen Bedingungen erfolgreich eingesetzt werden. Das Verfahren versagte bei GH₂-Einspritzung, als infolge der Verbrennungsturbulenz die Längenskala der Variation des Dichtgradienten nur noch Bruchteile der Laserstrahldurchmesser betrug. Dies führte zur optischen Auffächerung der Laserstrahlen und damit zur Zerstörung des Meßvolumens.

Für Wasserstoff als Probenmolekül war eine umfangreiche mehrjährige internationale Grundlagenforschung zur Ermittlung von Molekülparametern notwendig.

Die Messungen in der Modellbrennkammer ergaben weit niedrigere Temperaturen als theoretisch vorhergesagt. Bei der Auflösung des LOX-Strahles durch Scherkräfte mit nachfolgender Tropfenverdampfung traten selten stöchiometrische

Mischungsverhältnisse auf, was die Effizienz der Verbrennung negativ beeinflusste.

SCHRIFTTUM

1. Mayer W, Tamura H. Journal of Propulsion and Power, 1996; **12**: 1137-1147.
2. Yang V. AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics, 1996; **166**: 413-417.
3. Mayer W, Schik A, Schäffler M. AIAA J. Propuls Power 2000; **16**: 823
4. Druet S, Taran J-P, CARS Spectroscopy, Prog. Quant.Electr. Vol.7 pp.1-72
5. Eckbreth A. Laser Diagnostics for Combustion Temperature Species (2nd edn). Gordon and Breach; Amsterdam, 1996
6. Smirnov V, Clauss W, Oschwald M, Grisch F. 4th International Symposium on Liquid Space Propulsion, Heilbronn, Germany, 12-15.03.2000.
7. Clauss W, Fabelinsky V I, Kozlov D N, Smirnov V V, Stelmakh O M, Vereschagin K A. Dual-broadband CARS temperature measurements in hydrogen-oxygen atmospheric pressure flames. Appl.Phys B 70, 127-131 (2000)
8. Berger J-P. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 1994
9. Michaut X, Berger J-P, Saint-Loup R, Chaussard F, Berger H. Combustion Dans Les Moteurs Fuses, Toulouse, France, 26-28.06.2001.
10. Chaussard F, Michaut X, Saint-Loup R, Berger H, Joubert P, Lance B, Bonamy J, Robert D. J. Chem. Phys. 2000; **112**:158
11. Clauss W, Klimenko D N, Oschwald M, Vereschagin K A, Smirnov V V, Stelmakh O M, Fabelinsky V I.. CARS investigation of hydrogen Q-branch linewidths at high temperatures in a high pressure H₂-O₂ pulsed burner, J.Raman Spectrosc. 2002;**33**:906-911